

MODULAR, HIGH ENERGY, WIDELY-TUNABLE AND ULTRAFAST FIBER SOURCE

Publication number: JP2002118315 (A)

Publication date: 2002-04-19

Inventor(s): FERMANN MARTIN E; GALVANAUSKAS ALMANTAS;
HARTER DONALD J

Applicant(s): IMRA AMERICA INC

Classification:

- international: G02B6/02; G02F1/35; G02F1/37; H01S3/06; H01S3/067;
H01S3/10; H01S3/109; H01S3/23; H01S3/30; H01S3/00;
H01S3/094; H01S3/16; G02B6/02; G02F1/35; H01S3/06;
H01S3/10; H01S3/109; H01S3/23; H01S3/30; H01S3/00;
H01S3/094; H01S3/16; (IPC1-7): H01S3/10; G02B6/10;
G02F1/35; G02F1/37; H01S3/06; H01S3/109; H01S3/30

- European: H01S3/067G

Application number: JP20010154396 20010523

Priority number(s): US20000576772 20000523

Also published as:

DE10124983 (A1)

US2005111500 (A1)

US7394591 (B2)

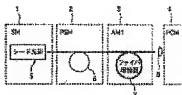
US6885683 (B1)

US2008232407 (A1)

Abstract of JP 2002118315 (A)

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a modular, compact and widely-tunable laser system for efficiently generating a high peak ultrashort pulses.

SOLUTION: System compactness is ensured by employing efficient fiber amplifiers, directly or indirectly pumped by diode lasers. Peak power handling capability of the fiber amplifiers is expanded by using optimizing pulse shapes as well as dispersively broadened pulses. Dispersive pulse broadening is introduced by dispersive pulse stretching in the presence of self-phase modulation and gain, resulting in the formation of high-power parabolic pulses. After amplification, the dispersively stretched pulses can be recompressed to nearly band width limit by the implementation of another set of dispersive delay lines. To ensure a wide tunability of the whole system, Raman-shifting of the compact sources of ultrashort pulses in conjunction with frequency-conversion in nonlinear optical crystals can be implemented. Further, a positively dispersing optical amplifier and a Raman amplifier fiber are utilized.



Data supplied from the esp@cenet database — Worldwide

(10) 日本特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-118315

(P2002-118315A)

(43) 公開日 平成14年4月18日 (2002.4.18)

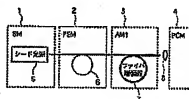
(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	キーワード (参考)
H 0 1 S	3/10	H 0 1 S	3/10 Z 2 H 0 5 0
G 0 2 B	6/10	G 0 2 B	6/10 C 2 K 0 0 2
G 0 2 F	1/35	G 0 2 F	1/35 5 0 1 5 F 0 7 2
	1/37		1/37
H 0 1 S	3/06	H 0 1 S	3/06 B
審査請求 未請求 請求項の数74 O L 外国出願 (全 78 頁) 最終頁に続く			
(21) 出願番号	特願2001-154308 (P2001-154308)		
(22) 出願日	平成13年5月23日 (2001.5.23)		
(31) 優先権主張番号	0 8 / 5 7 6 7 7 2		
(32) 優先日	平成12年5月23日 (2000.5.23)		
(33) 優先権主張国	米国 (U S)		
(71) 出願人	583185670 イムラ アメリカ インコーポレイテッド アメリカ合衆国 ミシガン州48105 アン アーバー ウッドリッジ・アベニュー1044		
(72) 発明者	マーチン・イー・ファーマン アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバ ー レイバイン コート 48315 基地		
(72) 発明者	アルマンテス・ガルバナスカス アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアーバ ー レイバイン コート 48315 基地		
(72) 代理人	100061776 弁理士 大川 宏		
最終頁に続く			

(54) 発明の名称 モジュール式、高エネルギー、広波長可変性、超高速、ファイバ光源

(57) 【要約】 (修正有)

【課題】 高ピーク超短パルスを高効率で発生するモジュール式小型広波長可変レーザーシステムを提供する。

【解決手段】 システムの小型化はダイオードレーザで直接あるいは間接にポンプされた効率のよいファイバ増幅器を採用することによって達成される。ファイバ増幅器のピークパワースタビリティは分散的に広がったパルスはもちろんだ。最適化されたパルス形状を使うことで、高められる。分散広がりは自己位相変調と利得の存在下で分散パルスが拡張することで導入され、高パワー放散増幅パルスの形成をもたらす。増幅後、分散的に広がったパルスは、別のセットの分散遅延ラインを実装することで、バンド幅限界近くまで再圧縮される。全体のシステムの広い波長可変性を確保するために、非線形光学結晶での周波数変換と合わせて超短パルスの小型光源のラマンシフトが実施される。さらに、正分散増幅器、ラマン増幅器、ファイバを利用する。



1

【待記請求項の範囲】

【請求項 1】0.3 nm 以上のスペクトルバンド幅と、約 50 fs と 1 ns の間のパルス幅とをもつ波長範囲 1 ~ 1.5 μm のパルスを発生するシード光源と、該パルスを入力して増幅し、増幅したパルスを出力する広いバンド幅のパルスのためのファイバ増幅器と、該ファイバ増幅器にレーザエネルギーを供給するためのポンプレーザと、を有するレーザシステム。

【請求項 2】前記シード光源は、ファイバレーザと、該ファイバレーザの出力を入力するラマンシフトと、該ラマンシフトの出力を周波数変換する非線形結晶と、を有する請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 3】前記ラマンシフトは、前記ファイバレーザの放射波長を 2000 nm より長いスペクトル範囲に上方変換するシリカベースのファイバであり、さらに前記非線形結晶は、その後、該上方変換された波長を 1000 ~ 1500 nm のスペクトル範囲に下方変換する、請求項 2 に関するレーザシステム。

【請求項 4】非線形結晶の波長調音機能は、ラマンシフトの出力の中心波長以下である請求項 2 に関するレーザシステム。

【請求項 5】前記ラマンシフトは、非増幅ファイバ、あるいは損失率分布と約 600 ~ 5000 nm の波長範囲のパルスを発生するために選定された発生部増幅イオンとをもつ増幅ファイバ、を有する請求項 2 に関するレーザシステム。

【請求項 6】前記シード光源は、Er ファイバレーザと、該 Er ファイバレーザの出力を入力し、前記ファイバ増幅器に出力するシリカラマンシフトファイバと、前記増幅されたパルスを入力するフッ化ラマンシフトと、を有し、前記ファイバ増幅器は、Tm ファイバ増幅器である、請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 7】周波数変換理論を実行するようにフッ化ラマンシフトファイバの出力を入力する非線形結晶をさらに有する請求項 6 に関するレーザシステム。

【請求項 8】前記シード光源は、Er ファイバレーザと、周波数変換理論を実行するように該 Er ファイバの出力を入力する非線形結晶と、該非線形結晶の周波数変換出力を入力するラマンシフトと、を有する請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 9】前記シード光源は、受動型モードロックファイバレーザであり、前記ラマンシフトファイバは、非線形結晶の周波数変換出力を約 750 nm から約 1050 nm の波長範囲にラマンシフトさせるために使用されるホーリファイバである、請求項 8 に関するレーザシステム。

【請求項 10】前記シード光源は、受動型モードロックファイバレーザであり、一連の非増幅ファイバおよび異なる損失率分布と異なる発生部増幅イオンをもつ増幅ファイバは、前記非線形結晶の周波数変換出力を約 750

(2)

特開 2002-118315

2

nm から約 5000 nm の波長範囲にラマンシフトするために使用される、請求項 8 に関するレーザシステム。

【請求項 11】前記シード光源は、受動型モードロックファイバレーザを有する、請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 12】前記受動型モードロックファイバレーザは、Yb ファイバレーザである、請求項 11 に関するレーザシステム。

【請求項 13】前記受動型モードロックファイバレーザは、Nd ファイバレーザである、請求項 11 に関するレーザシステム。

【請求項 14】前記受動型モードロックファイバレーザは、多モードである、請求項 11 に関するレーザシステム。

【請求項 15】前記受動型モードロックファイバレーザは、偏光保持である、請求項 14 に関するレーザシステム。

【請求項 16】前記受動型モードロックファイバレーザは、単一モードで偏光保持である、請求項 11 に関するレーザシステム。

【請求項 17】前記シード光源は、ファイバレーザと、該ファイバレーザの出力を入力し反ストークスブルーシフト出力を出力する周波数シフトファイバと、を有する、請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 18】前記ファイバレーザは、Er、Er/Yb、あるいは Tm ファイバレーザである、請求項 17 に関するレーザシステム。

【請求項 19】前記シード光源は、前記ファイバ増幅器で散乱状態パルスの生成を誘起するパルスを発生する、請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 20】前記シード光源と前記ファイバ増幅器との間にあって、該シード光源を該ファイバ増幅器に結合し、1 K m 以下の長さの光ファイバをもつ結合器をさらに有する請求項 19 に関するレーザシステム。

【請求項 21】前記ファイバ増幅器の出力に結合された光供給ファイバをさらに有する請求項 1 に関するレーザシステム。

【請求項 22】前記光供給ファイバは、ホーリファイバ、一本の散モードファイバおよび一本あるいは二本の単一モードファイバに接続された一本の散モードファイバからなる群から選択される請求項 21 に関するレーザシステム。

【請求項 23】前記シード光源は、前記ファイバ増幅器で散乱状態パルスの生成を誘起するように 100 ps より短いパルスを発生し、さらに、前記ファイバ増幅器は、10 より大きい利得をもつ、請求項 22 に関するレーザシステム。

【請求項 24】前記シード光源からパルスを受けて該パルスをちょうどよいときに分散的に拡張し、該拡張したパルスを前記増幅器に出力するパルス拡張器をさらに有

特開2002-118315

(3)

3

する請求項23に関するレーザシステム。

【請求項25】前記増幅されたパルスを時間的に圧縮するパルス圧縮器を有し、該パルス圧縮器の分散は、該パルス圧縮器がおおよそバンド幅限界パルスを出力するようなものである。請求項24に関するレーザシステム。

【請求項26】前記シード光源は、 T_m あるいは H_0 ファイバレーザと、該 T_m あるいは H_0 ファイバレーザの出力を入力し周波数変換部を有する非線形結晶と、を有する請求項1に関するレーザシステム。

【請求項27】前記ファイバ増幅器は、 Y_b あるいは N_d のどちらかが添加される請求項1に関するレーザシステム。

【請求項28】増幅されたパルスをおおよそバンド幅限界まで時間的に圧縮するためのパルス圧縮器を、さらに有する請求項1に関するレーザシステム。

【請求項29】前記シード光源は、直接変調された半導体レーザである請求項1に関するレーザシステム。

【請求項30】0.3nmより大きいスペクトルバンド幅と約50fsと1nsの間のパルス幅とをもつ1~

1.15μmの波長範囲のパルスを生じるシード光源と、該パルスを受けて該パルスをちょうどよいときに分散的に拡張し、該拡張したパルスを出力するパルス拡張器と、広いバンド幅のパルスに対して10より大きな利得をもち、該拡張したパルスを受けて増幅しかつ出力するクラッドポンプファイバ増幅器と、該増幅され拡張されたパルスを入力し、それらをおおよそバンド幅限界まで時間的に圧縮するパルス圧縮器と、を有するレーザシステム。

【請求項31】前記パルス拡張器は、1km以下の長さのファイバを有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項32】前記パルス拡張器は、ホーリファイバを有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項33】前記パルス拡張器は、一本の少数モードファイバを有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項34】前記パルス拡張器は、一本あるいは多数の単一モードファイバと一線に結合された一本の少数モードファイバを有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項35】前記パルス拡張器は、1km以下の長さの単一モードファイバを有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項36】前記パルス拡張器は、W状屈折率プロファイルをもつファイバを有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項37】前記パルス拡張器は、多クラッド屈折率プロファイルをもつファイバを有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項38】前記パルス拡張器は、奥の3次分散をもつ一本のファイバと、奥の2次分散をもつ複形チャープ

4

ファイバ屈折率と、を有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項39】前記パルス拡張器は、複形チャープファイバ屈折率と、パルス圧縮手段で高次分散を補償するように、3次および高次分散の選択できる値をもつあるいはより多くのファイバ選定屈折率と、を有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項40】前記パルス拡張器と前記パルス圧縮器の間に接続された複数の付加的ファイバ増幅器と、1km以下の長さの先ファイバを有し、前記シード光源を該複数の付加的増幅器の最初の一つに結合するファイバ結合器と、該ファイバ増幅器の前、該複数の付加的ファイバ増幅器の後、あるいは該増幅器とのつかの中間、のいずれかに配置された複数のパルス採集手段と、をさらに有する請求項30に関するレーザシステム。

【請求項41】0.3nmより大きいスペクトルバンド幅と約50fsと1nsの間のパルス幅とをもつ1~1.15μmの波長範囲のパルスを生じるシード光源と、少なくとも一つの前方パスと一つの後方パスで動作する増幅器であって、該パルスを受けて増幅し、出力する、広いバンド幅のパルスのためのクラッドポンプファイバ増幅器と、該ファイバ増幅器にレーザエネルギーを供給するためのポンプレーザと、該増幅器の一つの前方パスと一つの後方パスの間に配置された光波導と、を有するレーザシステム。

【請求項42】複数の付加的ファイバ増幅器と、ここで少なくとも一つおよび複数の付加的ファイバ増幅器は、少なくとも一つの前方パスと一つの後方パスで動作する前記の少なくとも一つのファイバ増幅器と複数の付加的ファイバ増幅器の最初のパスの後に配置された増幅器の単一モードを優先的に選定するモジュールと、をさらに有する請求項41に関するレーザシステム。

【請求項43】少なくとも一つの前方パスと一つの後方パスの間に配置された一つのパルス採集器を、さらに有する請求項42に関するレーザシステム。

【請求項44】2μmより大きい出力波長で動作するパルス光源であって、短パルス幅のパルスを出力するパルス光源と、該パルスを入力し、該出力波長を生じる第一ファイバマンシフタと、を有するパルス光源。

【請求項45】前記第一ファイバマンシフタに接続された少なくとも一つの付加的ファイバマンシフタと、該ファイバマンシフタの間にかわるがわる接続された複数のファイバ増幅器と、をさらに有する請求項44に関するパルス光源。

【請求項46】前記ファイバマンシフタの最後の一つに接続された増幅器をさらに有する請求項45に関するパルス光源であって、該非線形結晶の波長間隔曲線が、ランシフトされ増幅されたシードパルスのラン

スペクトル成分の中心波長以下に設定されるパルス光

50

特開 2002-118315

6

源。

【請求項 47】変動型モードロックファイバレーザと、該ファイバレーザの出力を増幅するための Y 増幅器と、を有する光パルス光源。

【請求項 48】前記変動型モードロックファイバレーザは、Y 増幅器を有する請求項 47 に開する光パルス光源。

【請求項 49】10 dB/km 以下の利得と 10 dB 以上の結合利得をもつ光ファイバ透過ラインに接続された純粋正分散ファイバ増幅器と、該光ファイバ透過ラインに配置された分散補償素子と、該光ファイバ透過ラインに配置された光学フィルタと、を有する光通信サブシステム。

【請求項 50】3 dB/km 以下の利得と 20 dB 以上の結合利得をもつ光ファイバ透過ラインに接続された純粋正分散ファイバ増幅器と、光ファイバ透過ラインの一端に配置された分散補償素子と、を有する光通信サブシステム。

【請求項 51】光ファイバ透過ラインに接続された正分散光ファイバ素子と、光ファイバ透過ラインにやはり接続された光分散要素と、を有する光通信サブシステムであって、該光ファイバ透過ラインを透過する光パルスで受けた自己位相変調の量は、光分散要素よりも正分散光ファイバ素子の方が多し、光通信サブシステム。

【請求項 52】前記負分散素子は、チャープファイバ回折格子を有する請求項 51 に列挙された光通信サブシステム。

【請求項 53】光ファイバ透過ラインに接続された純粋正分散をもつ複数のホーリファイバと、光ファイバ透過ラインにやはり接続された複数の光分散要素と、を有する光通信サブシステムであって、光ファイバ透過ラインを透過する光パルスで受けた自己位相変調の量は、光分散要素よりもホーリファイバの方が多し、光通信サブシステム。

【請求項 54】10 ns 以下の長さをもつポンパルス列を入力し、光信号も入力し、増幅し、出力する光ラマン増幅器ファイバを有する光通信サブシステムであって、該光信号は、該ラマン増幅器ファイバをポンパルスに関して反対方向に伝播する、光通信サブシステム。

【請求項 55】前記光ラマン増幅器は、前記ポンパルスに共鳴される同調操作で同調される、請求項 54 に開する光通信サブシステム。

【請求項 56】光パルスを出力するシード光源と、該光パルスを変調する変調器と、該変調された光パルスを入力するラマンシフトファイバと、該ラマンシフトファイバの出力を入力するラマン増幅器と、を有する請求項 55 に関する光通信サブシステム。

【請求項 57】前記同調操作は、前記シードパルスが前記ラマンシフトファイバに投入されるまでに、該シード

(4)

パルスのパワー、波長および幅の少なくとも一つを変調することを含む、請求項 56 に関する光通信サブシステム。

【請求項 58】前記ラマンシフトファイバは、分散がある意味で前記ラマンシフトを最適化するように波長で変化するホーリファイバである、請求項 9 に関するレーザシステム。

【請求項 59】シードパルスの光源と、該シードパルスを入力し増幅するファイバ増幅器と、を有するレーザシステムであって、該ファイバ増幅器で作られたパルスが放物線状であるように、該シードパルスは発生させられ、該ファイバ増幅器は、形作られる、レーザシステム。

【請求項 60】シードパルスの光源と、該シードパルスを入力し増幅し、増幅されたパルスを出力するファイバ増幅器と、を有するレーザシステムであって、そのシード光源は、該ファイバ増幅器で放物線状パルスの形成を誘起するパルスを発生する、レーザシステム。

【請求項 61】シードパルスの光源と、該シードパルスを入力し増幅し、且つ増幅したパルスを出力するファイバ増幅器と、を有するレーザシステムであって、該ファイバ増幅器で作られたパルスが放物線状であるように、該シードパルスは発生させられ、該ファイバ増幅器は、形作られる、レーザシステム。

【請求項 62】異なる波長の光パルスの光源と、該異なる波長の各々が経路したラマンシフトの度合いを動的に修正する手段と、を有する光通信サブシステム。

【請求項 63】異なる波長の光信号を伝送するファイバ光線送器と少なくとも一つのファイバレーザ増幅器とを有するタイプの光通信システムにおける、該異なる波長の信号に異なる利得を課する少なくとも一つのラマンシフトを有する改良。

【請求項 64】パルス出力を発生するファイバレーザと、該ファイバレーザのパルス出力を入力するラマンシフトと、該ラマンシフトの出力を順次増幅する非線形結晶と、を有するレーザシステムのためのシード光源。

【請求項 65】前記非線形結晶は、PPLN、PPLi、ウムタンタレート、PP MgO:LiNbO₃、PP KTP からなる群から選ばれた周期的にホールした強磁性光学材料と、KTP 異種同形体の周期的にホールした結晶とを有する請求項 64 に請求されたシード光源。

【請求項 66】請求項 65 に請求されたシード光源であって、前記非線形結晶の区画は、該シード光源のパルス出力のパルス長さを制御するために変化する、シード光源。

【請求項 67】前記非線形結晶の出力波長は、該非線形結晶の温度を制御することで制御される、請求項 65 に請求されたシード光源。

【請求項 68】供給ファイバと、回折格子型パルス圧縮器と、該パルス圧縮器の 3 次分散を補償するための W-

(5)

特開 2002-118315

8

ファイバと、を有する放物線状パルス体制で動作するファイバレーザシステム用供給システム。

【請求項 6】 放物線状パルス体制で動作するファイバレーザ増幅システム用分數補償配列であって、該システムの増幅器段の前に配置され、少なくとも一つの負の 3 次分數生成素子を含むパルス拾取器と、該拾取器で導入された分數を取り消す正の 3 次分數をもち、2 次分數を補償するために該増幅器段の後に配置されたパルス圧縮器とを有する分數補償配列。

【請求項 7】 放物線状パルス体制で動作するファイバレーザ増幅システム用分數補償配列であって、該システムの増幅器段の前に配置され、少なくとも一つの正の 2 次分數生成素子と 3 次と 4 次分數を生成するための少なくとも一つのブラッグファイバ回折格子およびファイバ透過回折格子を含むパルス拾取器と、該拾取器で導入された分數を取り消す正の 3 次分數をもち、2 次分數を補償するために該増幅器段の後に配置されたパルス圧縮器とを有する分數補償配列。

【請求項 7】 フェムト秒体制シードパルスの光と、ポンパルスを増幅するために該シードパルスを受けて波長シフトするラマンシフトファイバと、該ポンパルスを反対方向に伝播する複数の信号波長パルスを送入されたラマン増幅器ファイバと、該ポンパルスを波長周回するたため、該ラマン増幅器のラマン利得の中心波長を両調するために、該シードパルスのパワー、波長、幅の少なくとも一つを変調する手段と、を有する波長可変ラマン増幅器。

【請求項 7】 請求項 7 に請求された増幅器であって、前記ポンパルスを、前記信号パルスを有効な修正ラマン利得スペクトルに合わせるように、該ラマン増幅器の信号パルス情報時間以下の時間周期で波長周回される、増幅器。

【請求項 7】 1 ナノ秒以下のパルス幅をもつパルス出力を発生するファイバレーザと、分數が、波分波長周回を最適化するように波長に変化するホリファイバと、を有する波長可変レーザシステム。

【請求項 7】 パルス出力を発生するファイバレーザと、分數が、波分波長周回を最適化するように波長に変化するホリファイバと、を有する波長可変レーザシステムであって、波長周回範囲内で、該ホリファイバは、負の 2 次分數を示し、波長 300 nm 以内で入力パルス光源に対し 2 次分數ゼロをもち、シリカの 3 次材料分數の絶対値に等しい絶対値あるいはそれ以下の 3 次分數を示す、波長可変レーザシステム。

【0001】

【発明の背景】 1. 発明の分野

この発明は、波長選択ができ、コンパクトで、モジュール式で、かつ効率的な高パワー超短パルス光源に関し、この超短パルス光源は、超高速レーザ技術

の工業使用における基本的な構成要素である。

【0002】 2. 関連技術の記述

ファイバレーザは、これまで長い間、超短パルス発生用の有効な媒体と見なされてきた。しかしながら、これまで、そのようなシステムは、主に、波長可変性に対して制限されたオプションをもち、かつ最小の達成可能パルス幅に限界がある、局所的波長シフトした（チャープした）ブラッグ回折格子を使用した瞬時周波数が変化するパルス（チャープしたパルス）増幅に基づいていた（A. Galvanauskas and M.E. Fermann, "Optical Pulse Amplification using Chirped Bragg Gratings", United States Patent, No. 5,499,134）。チャープしたブラッグ回折格子は、実際に広く入手できるデバイスに発達してきた。そして、ブラッグ回折格子内のチャープは、線形に、あるいはチャープ増幅システム内で任意のオクタの分數を補償するために、非線形に、さえもデザインされる（A. Galvanauskas et al., "Hybrid Short-Pulse Amplifiers with Phase-Matched Compensation Pulse Stretchers and Compressors", U.S. Patent No. 5,847,853）。このチャープパルス増幅システムは、バンド幅制限パルス、すなわち、あらゆるパルスベクトルのパルスバンド幅にとって最も短くてできるパルス、の発生に重要である。

【0003】 光ファイバのパワーとエネルギーの限界を最大化するために、チャープパルス増幅を使用することは、明らかに望ましいが、同時に、システム集積化の要求（ブラッグ回折格子は、最も高い可能な分數を与えるために、透過および反射で動作する必要がある）は、そのような理想的なチャープパルス増幅システムの使用を排除する。チャープパルス増幅の代わりとして、多モードファイバ増幅器で高パワーパルス増幅が提案された（M.E. Fermann and D. Harter, "Single-mode Amplifiers and Compressors Based on Multi-mode Optical Fibers", United States Patent, No. 5,838,630）。またチャープパルス増幅の代わりとして、ファイバ増幅器でのソリトンラマン圧縮を使用することや、あるいは、一般的に、非線形ファイバ増幅器中でパルス圧縮を使用することが提案された（M.E. Fermann, A. Galvanauskas and D. Harter, "Apparatus and Method for the Generation of High-power Femtosecond Pulses from a Fiber Amplifier", United States Patent, No. 5,880,877）。

【0004】 明らかに、多モードファイバの使用は、そのようなシステムに性能をさらに改善するために、チャープパルス増幅およびソリトンラマン圧縮と結合される。しかしながら、今日まで、全体のシステム性能をさらに最適化するためのパルス形状制御法は、全然記述されなかった。同じく、そのようなチャープパルス増幅システムの体系部分に自己一位相調整を使用することとは、提案されていなかった。

【0005】 さらに、システムのコンパクト化と高エネ

9

ルギ化の折衷案として、パルク光学圧縮器と合同してファイバ分散遅延ラインを使用することは、有利であり、少なくとも、高-パワーファイバレーザシステムの部分的な最適化をもたらす(M.E.Ferreira A.Gilvanskas and D.Harvey, "All Fiber source of 100 nJ sub-picosecond pulse", Appl. Phys. Lett., vol. 64, 1994, pp. 1315-1317)。しかしながら、今日まで、パンド幅限界近くまでパルスを再圧縮するために、拡散器と圧縮器の組合せの中で、より高次の3次および4次分散を制御する有効な方法は、全然開発されなかった。

【0006】チャープパルス増幅の代わりとして、高-利用度分散(非ソリトン)を保持させるシリカベースの単一モードエルビウム増幅器をパルクプリズム圧縮器と組み合わせて使用することにより、有効なパルス圧縮が得られるということも以前に提議された(K.Tamura and M.Nakazawa, "Pulse Compression by Nonlinear Pulse Evolution with Reduced Optical Wave Breaking in Erbium-Doped Fiber Amplifiers", Opt. Lett., vol. 21, p. 65(1996))。しかしながら、この技術はシリカベースのエルビウム増幅器と合同して使用することは、問題である。なぜなら、正分散のための要求がファイバコアサイズを約8ミクロンに制限するか、さもなければ、他の材料分散が、正の増幅分散を支配し、金体を食のファイバ分散にするからである。同様に、シリカベースの多モードファイバは、エルビウム増幅器波長で負の分散をもち、有効なパルス圧縮のためにそれらを使用することを妨げている。このように、正分散エルビウム増幅器の限定されたコアサイズは、達成可能なパルスエネルギーを大きく減少させる。

【0007】さらに、一つのエルビウム増幅器の後で追加的なスペクトル拡大やパルス増幅を行う方法は、図付らによって示されなかった。同様に、エルビウム増幅器の分散を補償するためにプリズムパルス圧縮器の性能を最適化させる方法は、図付らによって教示されなかった。

【0008】チャープパルス増幅の別の代わりとして、非増幅ファイバをパルク回折格子圧縮器と合同して使用することが提案された(D.Grychowski et al. and J.Kafka et al., U.S. Patent No. 4,790,809)。しかしながら、そのようなシステムには利得がないので、高パルスエネルギーが、高出力パワーを得るために非線形光学素子に結合されなければならない。システムのピークパワー特性を低下させる。さらに、そのような光学配置で、より高次の分散を補償する方法は議論されておらず、このアプローチの実現性を大きく制限している。さらに、そのようなシステムへの入力でのパルス形状を制御することとして、線形チャープをもつスペクトル広がりには、非常に限定された入力パワーでのみ得られる。入力パルス形状の制御は、Kafkaらによって議論されなかった。同様に、パルク回折格子圧縮器と合同して最も短い可能な

(6)

特開2002-118315

10

パルスを得るために、そのような非線形光学素子における2次および3次分散制御が、必要とされるが、これもKafkaらによって議論されなかった。

【0009】別の(分散-補償)遅延線系中に色分散を使用する(「色パワー」)光波導路中の色分散補償は、電気通信システムの性能を最適化するために導入された(C.D.Poole, "Apparatus of compensating chromatic dispersion in optical fibers", US Patent No. 5,185,827)。しかしながら、高-パワーパルス光源の場合、分散-補償遅延線素子によって導入される自己一位相変動は、それらの有効な使用を妨げる。さらに、Pooleによって議論されたシステムは、分散-補償遅延線系中で高次モードを選択的に吸収するため、あるいは、分散-補償遅延線系中で基本モードを選択的に増幅するために、モード-変換器および、あるいは倍率増強ファイバと合同して動作するだけである。自己一位相変動の存在下での高-パワー光パルスの分散を補償する方法は、何ら教示されなかった。また、モード-変換器なしの分散-補償遅延線系を実施する方法は、何ら提議されなかった。

【0010】モード-変換器と高次モードを使用する代わりとして、W-スタイルの屈折率プロファイルをもつファイバが知られている(B.J.Ainslie and C.R.Dav, "A review of single-mode fibers with modified dispersion characteristics"; J.Lichonowicz Techn., vol. 17-4, No. 8, pp. 967-979, 1988)。しかしながら、高-パワーファイバチャープパルス増幅システムへの、そのようなファイバデザインの使用は、議論されることがなかった。

【0011】超高速ファイバ増幅器の効率を最大化するために、Ybファイバ増幅器の使用が提案された(D.T. Walton, J. Nees and G. Mourou, "Broad-bandwidth pulse amplification to the 10¹¹ level in an ytterbium-doped germanosilicate fiber", Opt. Lett., vol. 21, no. 14, pp. 1061(1996))。しかしながら、Waltonらによる研究は、低帯域パルスの光源としてモードロックT₁:サファイアレーザを採用するばかりでなく、Yb増幅ファイバの励起にアルゴンレーザポンプT₂:サファイアレーザを採用したが、これは、非常に効率が悪く、且つ明らかにお互に互立しない。さらに、増幅過程で光パルスの位相を制御する方法は、何ら提案されなかった。すなわち、T₁:サファイアレーザからの0.01 fsの幅のモードパルスが、1.8 kmの長さの単一モードファイバ分散遅延ラインを通してYb増幅器に結合されたが、この遅延ラインは、システムを超高速増幅に適用することを大きく制限する高次分散による大きな位相歪みを起こす。それよりは、Yb増幅器中で高品質高-パワー放物線状パルスを誘起するためには、2.00-4.00 fsの幅のシードパルスが2.3 mの長さのYb増幅器には行き過ぎ、Waltonらによる単一モードYb直順ファイバ増幅器

11

の使用は、Yb増幅器のエネルギーとパワーの限界をさらに大きく制限する。多モードYb添加ファイバの使用は、内容にさらに参考文献として組み入れられた米国出版No. 09/317,221に提案されたが、Yb増幅器と対立する小型短パルス光源は、わかりにくいまま残った。

【0012】能動的な光変調機構に組み入れられる広可変パルスYb-ファイバレーザが、最近記述された(J. Porta et al., "Environmentally stable picosecond yttrium fiber laser with a broad tuning range", Opt. Lett., vol. 23, pp. 615-617 (1998))。このファイバレーザは、およそYbの利得バンド幅内の調製範囲を稼働しているが、そのレーザを超高速度光学に適用することは、そのレーザで発生される比較的長いパルスにより制限される。一般的に飽和モードロックレーザは、安価モードロックレーザより長いパルスを生じる。この現状のケースでは、発生したパルスのバンド幅は、5 psの最小パルス幅をもち、25 nmである。

【0013】非線形結晶中の周波数変換と共同してラマンシフトを使った広帯域可変ファイバレーザ光源が、最近記述された。(M.E. Fermann et al., US Patent No. 5,880,877 and N. Nishizawa and T. Goto, "Simultaneous Generation of Wavelength Tunable Two-Colored Femtosecond Soliton Pulses Using Optical Fibers," Photonics Technol. Lett., vol. 11, no. 4, pp. 421-423 (1999))。基本的には、空間的に不変なラマンシフトが提案され、その結果、波長可変範囲は300-400 nmに制限される(Nishizawa et al. 参照)。さらに、ラマンシフトの継続する応用や、非線形光学結晶での非線形周波数変換に替って高度な非線形システムでのノイズを最小にする方法も、何も知られていない。さらに、西沢らによって記述されたシステムは、ラマンシフトをシードするための付加的な偏光刺激エルビウムファイバ増幅器で増幅された比較的短波長低パワー帯域刺激エルビウムファイバ増幅器につながった。さらに、Erファイバレーザからの周波数変換出力のラマンシフトを可能にする方法も、何も記述されていない。

【0014】高パワーファイバ増幅器からのパルスで、あるいは、高パワーファイバ増幅器からの周波数変換されたパルスで、直接シードされたラマンシフトが明らかに好ましい。そのようなファイバ増幅器は、最近多モード光ファイバを使って記述された(M.E. Fermann, "Technique for mode-locking of multi-mode fibers and the construction of compact high-power fiber laser pulse sources", U.S. serial number 09/199,728)。しかしながら、ラマンシフトをその後使用したような増幅器の周波数を変換する方法は、今日まで検証されたことがない。

【0015】

【発明の要旨】したがって、本発明の目的は、モジュ

(7)

特開2002-118315

12

ル化しやすく、小型、広帯域可変、高ピーク、高平均パワー、低ノイズ超高速ファイバ増幅レーザシステムを提供することである。

【0016】1) 短パルスシード光源、2) 広バンド幅ファイバ増幅器、3) 分散短パルス拡張素子、4) 分散パルス圧縮素子、5) 非線形周波数変換素子、6) ファイバ分配用光学部品、のような様々な容易に交換できる光学系を使用することで、システムのモジュール化を確実に行うことが、発明の別の目的である。さらに、提案された任意のモジュールは、交換できる光学系の下位セットに構成される。

【0017】高度に集積化された分散短パルスラン、ダイオードレーザで直接あるいは間接にポンプされた有価なファイバ増幅器も、使用することで、システムの小型化を確実にすることが、発明の別の目的である。ファイバ増幅器の高ピークパワー特性は、放物線状あるいは他の最適化されたパルス形状を使うことで、大きく拡大される。自己位相変調と共同して、放物線状パルスは、大バンド幅、高ピークパワーパルスの発生も、良く制御された分散パルス並列も、可能にする。高パワー放物線状パルスは、ファイバの材料分散が正である波長で動作する高利得の準一あるいは多モードファイバ増幅器で発生される。

【0018】放物線状パルスは、自己位相変調あるいは一般的なカー効果型光学非線形性の存在下でも相当なファイバ長にわたって分配されるかあるいは伝送され、十分に線形なパルスチャープを招く。そのようなファイバ分配あるいはファイバ伝送ラインの端で、パルスは、おおよそバンド幅限界まで圧縮される。

【0019】さらに、ファイバ増幅器の高エネルギー特性は、放物線状パルスあるいは他の最適化されたパルス形状と共同してチャープパルス増幅を使用することで大きく拡大され、そのパルス形状は、パルス品質の劣化なしに波山の自己位相変調を可能にする。より高度に集積化されたチャープパルス増幅システムは、パルス光学パルス圧縮器(あるいは非線形特性ブラッグ回折素子)あるいはパルス圧縮と周波数変換と結びつける局所的に色分散の配向を備えた(ボールした)非線形結晶を使用することで、高ファイバの高エネルギー特性を損なうことなく作られる。

【0020】ファイバパルス拡張器とパルス光学圧縮器での分散は、調整可能な2次、3次、4次分散をもつファイバパルス拡張器を組み込むことで、4分の1のオーダーの位相に適合される。調整可能な高次分散は、それ自身であるいは、線形チャープファイバ回折素子と共同して標準的な周波数状態準分布(ステップインデックス)高開口数ファイバを使用することで最適化された周波数分布をもつ高開口数単一モードファイバを使って、得られる。あるいは、高次分散は、高開口数の数モードファイバでの高次モードの分散特性を使用する。選

特開2002-118315

(8)

14

型ファイバ回折格子と台同して非線形チャープファイバ回折格子あるいは線形チャープファイバ回折格子を使用することで、制御される。調整可能な4次分散は、ファイバブラッグ回折格子、透過型ファイバ回折格子のチャープを制御し、且つ異なる割合の2次、3次、4次分散をもつファイバを使用することで、得られる。同様に、高次分散は、局所的にポーリングした非線形結晶を使用することで得られる。

【0021】ファイバ増幅器は、好ましくは短パルスファイバ光源の形をした短パルスレーザ光源でシードされる。Ybファイバ増幅器の場合、ラマンシフトした周波数短パルスEファイバレーザ光源が、広波長可変シード光源として、供給される。1.5 μm から1.0 μm への周波数変換のノイズを最小にするために、Eファイバレーザパルス光源の自己-制限ラマンシフトが使われる。あるいは、非線形周波数変換プロセスのノイズは、自己-制限周波数変換を実施することで最小化される。送信結晶の固有曲線の中心波長は、ラマンシフトパルスの中心波長より短い。

【0022】ラマンシフトと周波数変換のプロセスは逆にすることも可能である。ここでは、Eファイバレーザは、最初周波数変換され、その後800 nm前後の波長と、1 μm の波長体利用のシード光源をつくるためのより高い波長と、に対してソリトン-維持分散を与える最適化されたファイバで、ラマンシフトされる。

【0023】Yb増幅器用の低-遅延シード光源の代わりとして、モードロックYbファイバレーザが使用される。ファイバレーザは、強くチャープしたパルスを作るようにデザインされ、光学フィルタが、Yb増幅器用バンド幅限外近辺にシードパルスを選定するために結合される。

【0024】放物線状パルスは、十分なファイバ長に沿って伝送されるので、そのパルスは、ファイバ光学遅延システムにも使用される。このシステムでは、外部パルス光源で発生された放物線状パルスが伝送される。あるいは、放物線状パルスは、伝送プロセスでも発生される。前者のケースでは、伝送システムでの光学非線形性の有害な作用が、低い、分散型、正分散増幅器を実施することで一般的に最小化される。そのような増幅器は、少なくとも10 kmの長さとし0 dB/km以下の利得をもつ。増幅器当たりの全利得は、光学非線形性の有害な作用の最小化のための放物線状パルス形成の開始を活用するために、10 dBを越えるべきである。伝送ラインのチャープ補償は、ファイバ伝送線に沿って伝送線の端部にもチャープファイバブラッグ回折格子を使用することで、顕著な実施される。光学バンド幅フィルタが、伝送したパルスのバンド幅制限のために、さらに実施される。

【0025】光ファイバでの短パルスのラマンシフトに基づく波長可変パルス光源は、多くの応用、たとえば、

分光分析で有益である。しかしながら、電気通信システム用の波長可変ファイバラマン増幅器の製作にラマンシフトを応用することで、非常に能力的な装置が作られる。この波長可変システムにおいて、ラマンシフトしたポンパルスは、可変波長範囲のためにラマン利得を与え、ポンパルスに関して赤にシフトされる。さらに、ラマン利得スペクトルの形状は、ラマンシフトしたポンパルスを変換することで、制御される。

【0026】

【提出された実施例の詳細説明】発明の一般化されたシステム図が、図1に示される。レーザシード光源1（シードモジュール；SM）で発生されたパルスは、パルス拡張モジュール2（PSM）に結合され、そこでパルスは、分散的に時間が増幅される。拡張されたパルスは、クラッドポンプされたYbファイバ増幅器3（増幅器モジュール、AM1）の基本モードに結合され、そこでパルスは、少なくとも10倍増幅される。最後に、パルスは、パルス圧縮モジュール4（PCM）に結合され、そこでほぼバンド幅限外近くまで時間的に圧縮される。

【0027】図1に示した実施例は、モジュール型で、4つのサブシステム；SM1、PSM2、AM13、PCM4、からなる。サブシステムは、別の実施例に記載されたように、異なる形状にはもちろん、個別でも使用される。

【0028】以下、図論はSM-PSM-AM1-PCMシステムに関連する。SM1は、好ましくはフェムト秒パルス光源（シード光源5）を有する。PSMは、好ましくは一本のファイバ6を有し、SMとPSMの間の結合は、好ましくは融着で行われる。PSMの出力は、好ましくはAM1モジュール3の内部のYb増幅器7の基本モードに注入される。結合は、融着、ファイバ結合器、あるいはPSM2とファイバ増幅器7の間のバルク光学結合システム、で行われる。すべてのファイバ6は、好ましくは偏光剛性を有する。PCM4は、好ましくは小型化の理由で、一つあるいは二つのバルク光学回折格子で形成される分散遅延ラインを有する。あるいは、多数のバルク光学プリズムやブラッグ回折格子がPCM4で使われる。PCM4への結合は、図1に単線8で描画されているように、バルク光学レンズシステムで行われる。ファイバブラッグ回折格子を含むPCMの場合、ファイバビッチャルがPCMへの結合に使われる。

【0029】フェムト秒レーザシード光源の一例として、ラマンシフト周波数短パルスEファイバレーザが、図2のSM1 b内に示されている。フェムト秒レーザ9は、波長1.5 μm で200 fsのパルス、繰り返り周波数50 Hzで1 nJのパルスエネルギーを供給する市販の高エネルギーソリトン光源（BRA America, Inc., Fastolux B-50TH）である。

【0030】1.5 μm から2.1 μm の波長領域への

(9)

特開2002-118315

16

最適なランシフトのために、偏光保持ランシフトファイバ10の長手方向にコア径(テーパー化した)を施すことが行われる。コア径の減少は、1.5から2.1 μm までの全波長範囲でランシフトでの2次分岐を導く(しかし)近くまで導くために必要とされる。2次分岐の絶対値を小さく保つことで、ランシフト内でのパルス幅が最小化される。このことは、ランシフトの最大値をもち(3, P. Gordon, "Theory of the Soliton Self-Frequency Shift," Opt. Lett., 11, 662 (1986)), テーパー化では、ランシフトは、一般に2.00 μm 前後に制限され、この2.00 μm は、周波数適応後もYbファイバ増幅器の利得バンド幅と一致しない。

[0031] この特別の間では、それぞれ8 μm と4 μm のコア径をもつ30 μm と3 mm の長さのシリカランシフトファイバ(1.56 μm で単一モード)からなる2段階ランシフト10が実施される。シリカの非線形吸収の倍率が2.0 μm であることにより、ランシフト10の終端方向にテーパー化する率を増加することが有利である。現在の例では、1.57 μm から2.10 μm への波長効率25%以上が得られている。なめらかに変化するコア径をもつ、より多数のファイバを使うか、あるいはなめらかに変化するコア径をもつ単一のテーパーファイバを実施することで、よりよい波長効率を得られる。

[0032] ランシフトしたパルスの1.05 μm 領域への周波数変換は、適宜に選定されたポーリング範囲をもつ一本の周期的にポルしたLiNbO₃(PPLN)結晶11で行われる。(この仕様であるが、周波数変換の好ましい材料は、PPLNのように必要であり、他の周期的にポルしたPPLチウムタンタレート、PPMgO:LiNbO₃、PPKTPのような強電性光学材料あるいはKTP異形体の周期的にポルした結晶も有利に使用されることが理解されるべきである。) PPLN結晶11との結合は、図2にレンズ12と示されたレンズシステムを使って行われる。PPLN結晶11の出力は、レンズ12で出力ファイバ13に結合される。1 μm の波長領域で40 μm 以上のパルスエネルギーをもたらす2.1 μm の周波数変換の場合、16%の変換効率を得られる。周波数変換されたパルスのスペクトル幅は、PPLN結晶11の長さの適宜な選択で選定される。たとえば、13 mm の長さのPPLN結晶は、約800 fsのパルス幅に対応する1.05 μm 領域での2 nm のバンド幅を生成する。発生されたパルス幅は、おおむねPPLN結晶の長さに比例する。すなわち、400 fsのパルス幅をもつ周波数変換されたパルスは、長さ8.5 mm のPPLNを必要とする。このパルス幅は、周波数変換されたパルス幅が、約100 fsに達するまで縮められ、ランシフトしたパルスの制限された100 fsのパルス幅は、さら

なるパルス幅の減少を制限する。

[0033] さらに、周波数変換されたパルス幅がランシフトしたパルスのパルス幅より十分長いとき、ランシフトの広いバンド幅は、周波数変換されたパルスの波長間隔を可能にするために活用される。すなわち、有効な周波数変換は、周波数2($\omega_1 - \delta\omega$)から2($\omega_1 + \delta\omega$)までのパルス範囲によって得られる。ここで、2 $\delta\omega$ は、ランシフトしたパルスのスペクトルの最大値の半分のスペクトル幅である。ここでの連続波長間隔は、周波数変換結晶11の温度を調節することで簡単に変わる。

[0034] ランシフト、PPLN結晶の組み合わせ、の増幅されたノイズは、次のように最小化される。Erファイバレーザパルス光源の自己調製ランシフトは、ランシフトをシリカベースの形ファイバでの2 μm より大きい方に拡張することで使用される。2 μm 以上の波長の場合、シリカの非線形吸収がパルスを大きく減衰し始め、ランシフトの非線形増幅効果の減少をもたらす。すなわち、1.6 μm での増加したパルスエネルギーは、より大きなランシフトや2 μm の波長領域でのより大きな吸収に移るのに役立つ。この増加は、したがってこの領域でのランシフトしたパルスの振幅を安定化させる。

[0035] あるいは、非線形周波数変換プロセスのノイズは、自己調製周波数変換を行うことで最小化され、その場合、通信結晶の周波数線の中心波長は、ランシフトしたパルスの中心波長より短い。再び、1.6 μm 領域での増加したパルスエネルギーは、より大きなランシフトに移り、減少した周波数変換効率を引き起こし、したがって、周波数変換したパルスの振幅が安定化される。したがって、一定の周波数変換されたパワーは、入力パワーの大きな変化に耐えて得られる。

[0036] これが図3に示されており、ここで、1 μm 波長領域での周波数変換された平均パワーが、1.56 μm での平均入力パワーの関数として示されている。自己調製周波数変換は、図3にも示すように、1 μm の波長領域での周波数変換が1.56 μm の波長領域での平均入力パワーに依存しないということを確実にする。

[0037] PSM2はいくつかの選択できる物がある。図1に示すように、PSMとして一本のファイバ(拡張ファイバ)が使用されると、システムからバンド幅制限に近いパルスを得るために、適当な分岐遅延ラインがPCM4に使用される。しかしながら、PCM4の分岐遅延ラインが、図4に示すようにパルスの回折特性14から構成されると、かなりの遅延が生じる。2次と3次の比1/3/21次分岐は、1 μm の波長領域で動作する典型的な階段状回折率分布ファイバでの2次と3次の比1/3/21次分岐に比べて、回折格子型分岐遅延ラインで1-30倍大きい。さらに、1 μm の波長領域

(10)

特開2002-118315

17

域で動作する屈折率分散をもつ複屈折性屈折率分布ファイバの場合、ファイバでの3次分散の符号は回折格子型分散遅延ラインでの符号と同じである。このように、回折格子型屈折率分散と合調してファイバ屈折率は、システムでの3次および高次分散の補償のための予備手段にならない。

[0038] 10倍以上のパルス拡張を行うためには、3次および高次分散の制御が、PCM4での最適パルス圧縮に重要になる。この問題を打越するために、PSM2の拡張ファイバ15は、形状多クラッド屈折率分布をもつファイバ、すなわち、*「W-ファイバ」* (B.J.Ainslie et al.) あるいはホリファイバ (T.M.Morose et al., "Wiley Optical Fibers: An Efficient Model Model, J.Lichow Techn., vol. 17, no. 6, pp. 1093-1102) と置き換えられる。W-ファイバとホリファイバの両方は、2次、3次、および高次の分散の調整可能な値を許容する。Wおよびホリファイバで可能な小さいコアサイズにより、複屈折性単一モードファイバでの値より大きな3次分散の値が得られる。実際は、図1に示されているのに類似しており、別々には表示されない。そのようなシステムの実用性は、PSMが純粋に透過型で動作するということである。すなわち、PSMは反射型で動作する分散フラッグ回折格子の使用を避け、異なるシステム構成のためにシステムの中および外に接続される。

[0039] 2次、3次、および4次分散の調整可能な値をもつ別のPSM2が図5に示されている。PSM20aは、通常の屈折率分散分布光ファイバが、正、ゼロ、あるいは、負いずれかの3次分散を作ることができない原理に基いている。ファイバでの最も高い3次分散の値は、ファイバの最初の高次モード、カットオフ近くのLP₁₁、モード、を使うことで作られる。図5で、PSM20aの4次と3次分散は、パルス拡張ファイバの3区間15、16、17を使うことで、調整される。最初の拡張ファイバ15は、ゼロの3次と適切な4次分散をもつ単一のファイバである。最初の拡張ファイバ15は、2番目の拡張ファイバ16に接続され、全チャープパルス増幅システムはもろく、回折格子圧縮器の3次分散を補償するために選定される。LP₁₁、モードの3次分散の復元性を確保するために、最初の拡張ファイバ15は、2番目の拡張ファイバ16と互いのファイバ中心でオフセットをもって接続され、2番目の拡張ファイバ16でのLP₁₁、モードの主な励起をもたらし、2番目の拡張ファイバ16での3次分散の値を最大化するために、高開口数NA>0.20をもつファイバが望ましい。3番目の拡張ファイバ17の基本モードの後にLP₁₁、モードを拡張させるために、2番目の拡張ファイバ18の端部で、類似の接続技術が使われる。ファイバの適切な長さによって、全増幅器、圧縮器の4次分散が最小化される。3番目の拡張ファイバ17は、無視できる分散をもち、短くできる。

[0040] 光学的なモード変換器の使用なしでLP₁₁、モードからLP₀₁、モードへのパワー伝達を行うことで受ける遅けられない50%あるいはそれ以上の損失により、全ファイバ拡張アセンブリの伝達損失は、少なくとも25%である。2番目の拡張ファイバのLP₀₁、モードの損失のエネルギーは、図6に示すように、選択できる反射型ファイバ格子18で反射される。基本モードと次の高次モードとの間の有効屈折率の大きな差により、二つのモード間で回折格子共振長が10-40nmの間変化する。10-40nmの間のスペクトル幅をもつパルスのために一方のモードを他方に対して選択的に排除することを許容する。

[0041] ファイバ拡張アセンブリのエネルギー損失は、3番目の拡張ファイバ17をYb増幅器に同期させることで、小さくされる。この実施は、別々に示されない。

[0042] 4次分散が大きくなるとき、最初の拡張ファイバ15は取り除かれる。3次と4次分散が最初と2番目の拡張ファイバの間で異なりさえすれば、4次分散もゼロでない3次分散をもつ最初の拡張ファイバを使用することで、補償される。

[0043] AM13の内部のYb拡張ファイバは、Yb拡張レベルが2、5%程度で、長さが5mである。単一モードおよび多モード両方のYb拡張ファイバが使用され、出力ビームの空間的品質を最適化するために、多モードファイバの場合基本モードが励起されるが、ファイバのコア径は、1-50μm間変えられる。必要とされる制御の値に依存して、異なる長さのYb拡張ファイバが使用される。最も高い可能なパルスエネルギーを生じさせるために、長さ1mのYbファイバが実施される。

[0044] パルス圧縮は、PCM4で行われる。PCM4は、通常のパルス光学部品(図4に示すパルス回折格子対のような)、単一回折格子圧縮器、あるいは、多数の分散フリーズやその他の分散遅延ラインを含む。

[0045] あるいは、ファイバパルスクラック回折格子あるいはチャープした周期的にポラリズした結晶は、パルス圧縮と局所放電通信の機能を結びつけ (A.Galvenaski et al., "Use of chirped quasi-phase matching materials in chirped pulse amplification systems" U.S. Application No. 08/822,967, その内容は、ここに参考文献で具体化されている)、独自のコンパクトシステムのために伝送供給するように動作する。

[0046] 本発明に対する他の変更や修正は、これまでの開示や教示からの技術に熟練したものに明白である。

[0047] 特に、SM1は、周波数帯域1.52-2.2μmのバンド幅近くに限定されたフェムト秒パルスを作るための自立ユニットとして使われ、非線形結晶での周波数変換後に周波数帯域760nm-1.1μm

(11)

特開2002-118315

20

のバルスを作るのにも使われる。周波数領域は、フッ化ラマンシフトファイバあるいはシリカより長い赤外線吸収をもつ他の光ファイバを使うことでさらに拡大される。この技術を使って、約3-5 μm 以上の波長が達成される。周波数通信と共に、760 nmから5000 nmまでの連続領域が達成される。2 μm 領域のバルスパワーは、TmあるいはHo添加ファイバを使うことで、さらに高められる。そのような増幅器で、バンド幅領域近隣の10 nmを超えるバルスエネルギーをもつラマンソリトンバルスが、2 μm の波長領域の単一モードファイバに供給される。周波数通信後、数nJのエネルギーをもつフェムト秒バルスが、分散バルス圧縮器の使用なしで、1 μm 領域で得られる。そのようなバルスは、大きなコアの多モードYb増幅器のために高エネルギーバルスとして使用され、多モードYb増幅器は、増幅された自然放出を抑えるために単一モードYb増幅器より高いソリトンバルスエネルギーを必要とする。

[0048] シリカラマンシフト20、Tm添加増幅器21および第2のフッ化ガラスベースラマンシフト22をもつフッ化パラレーザ光源23と組み合わせた超広波長可変ファイバ光源の一例が図8のSM1cに示されている。選択できる周波数増幅器は示されていない；最適な安定性のために、全てのファイバは偏光保持でなければならない。Erファイバレーザ光源に代わるものとして、Er増幅器をもつダイオードレーザ光源の組合せが使われる；これは分けて示されない。

[0049] SMの別の代わりとして、SM1dが図7に示されており、ラマンシフトホリファイバ24と合間して周波数通信パワー変動型モードロックErあるいはEr/Ybファイバ増幅器23を有する。ここで、1.55 μm の波長領域で動作する発振器23からのバルスは、周波数増幅器25とレンズ系26を使って波長に周波数通信され、その後周波数通信されたバルスは、750 nm以上の波長あるいは少なくとも810 nm以上の波長に対してソリトン・衝動分散を与えるホリファイバ24でラマンシフトされる。1 μm 波長帯あるいは1.3、1.5、2 μm 波長帯でラマンシフトしたバルスを増幅し、且つ異なるデザインでラマンシフトファイバを選定することで、波長領域が約750 nmから5000 nmの間に動作する連続的に可変な光源が作られる。多数の付属増幅器27をもつそのような光源のデザインも図7に示されている。

[0050] 最適なラマン自己一周波数シフトのために、ホリファイバ分散が、波長の関数として最適化されなければならない。ホリファイバの3次分散の絶対値は、シリカの3次材料分散の絶対値以下か、あるいは等しくなければならない。これは、2次分散の値が負でなければならない。2次分散ゼロがシード入力波長で300 nm以内でなければならないからである。

[0051] Yb増幅器用シード光源の別の代物として、反ストークスファイバでの反ストークス発生が使用される。反ストークス発生後、広い波長可変光源を作るために、付加的長さのファイバ増幅器とラマンシフトが使用される。一般的な構成は、図7に示されているものに類似している。ここで、周波数通信手段25は省略され、ラマンシフト手段24は反ストークス発生手段と置き換えられる。たとえば、1.55 μm で動作するErファイバレーザシード光源を使った反ストークス発生手段で、1.05 μm 波長帯の光を効率よく発生するために、小さいコアと低い値の3次分散をもつ光ファイバの形をした反ストークス発生手段が最適である。3次分散の低い値は、ここでは、1.55波長帯域での標準的な電子遷移ファイバの3次分散の値に比べて小さい3次分散の値と定義される。さらに、反ストークスファイバの2次分散の値は、負でなければならないYb増幅器の別の代物シード光源として、変動モードロックYbあるいはNdファイバレーザがSM内部に使用される。好ましくは、分散で動作するYbソリトン発振器が使用される。Ybソリトン発振器を作るために、図8に示すように、出力ファイバ36に接続されたチャープファイバ29によって非共振分散が共振器内に導入される；あるいは、ホリファイバ(T.Morone, et al.)のような非分散ファイバがYbソリトンレーザ共振器に使用される。そのような配列を具体化するSMが、図8中に1eとして示されている。ここで、Ybファイバ30は、偏光保持で、優先する1がファイバ（結合がレンズ32で達成されている）の一つの軸に沿って共振を導くために導入される。共振のために、Ybファイバ30は、図8に示すように、側面からクラッドポンプされる。しかしながら、通常の単一モードファイバを組み入れる変動モードロックYbファイバレーザも使われる。そのような配列は別々に示されていない。図8付子35は、分散制御のために使用され、また、内部共振器ミラーとして使用される。ポンプダイオード33は、V溝34を通してポンプ光を供給する。

[0052] ホリファイバを組み入れる配列は図8に示したシステムとはほとんど同じであり、ここで付加的なホリファイバは共振のどこかに接続される。ホリファイバを組み入れる場合、ファイババック図回折格子は負分散をもつために不要であり、同様にバック図回折格子は誘電体ミラーで置き換えられる。

[0053] 実施するのに最も簡単なものは、しかしながら、正分散で動作するYb発振器であり、それは、共振器分散を制御するために負分散ファイババック図回折格子あるいは、ホリファイバのような特定の共振器要素を必要としない。放散増幅Yb増幅器（あるいは通常のYb増幅器）と共に、高パワーYb増幅器システムのための非常にコンパクトなシード光源が得られる。Yb増幅器40をもつそのようなYb発振器が図9に示

(12)

特開2002-118315

21

22

されており、ここで、好ましくは、Yb増幅器40は後に議論するような「放物線状」Yb増幅器である。図8中と同じ表裏面は同じ番号が付与されている。

【0054】図9中のSM1fは、図8に関して記述されたような側面プロファイルYb増幅器40を有するが、他のボウリング部列も表裏されている。Ybファイバ44は、当然導光保持で、導光子31が単一の導光状態を導光するために挿入される。ファイバプロファイル37は、Ybの利得バンド幅に比べ小さな反射バンド幅をもち、Ybの利得バンド幅に比べ小さなバンド幅をもつパルスの発生を抑制する。プロファイル37はチャープされるか、あるいはチャープされない。チャープされないプロファイルの場合、Yb増幅器内で発生するパルスは、正にチャープされる。Yb増幅器内のパルス発生あるいは受動モードロックは、送受光吸収体28で始められる。光ファイバ39は行動的で、Yb増幅器40に送り出されたパルスのバンド幅をさらに制限する。

【0055】SM1f内のYb増幅器40内の放物線状パルスの形成を促進するために、入力パルスはYbの利得バンド幅に比べ小さなバンド幅をもつべきである；またYb増幅器40への入力パルス幅は、出力パルス幅に比べ小さくなければならない。Yb増幅器40の利得はできるだけ高く、すなわち、10以上でなければならない。また、Yb増幅器40内の利得幅は小さくなければならない。

【0056】放物線状増幅器の一例として、長さ5mのYb増幅器が使用される。放物線状パルスの形成は、約0.2-1psのパルス幅と3-8nmのスペクトルバンド幅をもつシード光源を使用することで達成される。放物線状パルスの形成は、Yb増幅器40内でシード光源のバンド幅を約2-30nmまで広げることができ、出力パルスは、約2-3psに広げられる。放物線状パルス内でのチャープが高度に線形であるので、圧縮後に100femtosecondのパルス幅が得られる。無源的な超高速固体増幅器が自己位相変調からの非相干位相シフトを p_1 （最近の技術で良く知られた）と同じ大きさだけ許すので、放物線状パルスファイバ増幅器は、 $10^4 p_1$ およびそれ以上の大きさの非相干位相シフトを許すことができる。簡単のために、我々はYb増幅器を放物線状増幅器と呼ぶ。放物線状増幅器は単純な幅尺に似て、増幅器長を適当に増やすことで、1nmあるいはそれ以下のスペクトルバンド幅をもつ放物線状パルスの発生を可能にする。たとえば、約2nmのスペクトルバンド幅をもつ放物線状パルスが、約100nmの長さの放物線状増幅器を使用することで発生される。

【0057】放物線状パルスが自己変調の大きな値と、パルスの中断を招くことなしのスペクトル広線の大きな値とを許すことができるので、放物線状増幅器のピークパワーは、標準的な増幅器に比べ大きく高められる。

これは次のように説明される。長さLの光ファイバでの自己位相変調を受けた時間依存位相遅れ $\phi_1(t)$ はピークパワーに比例する。すなわち、

$$\phi_1(t) = \gamma P(t)L,$$

ここで、 $P(t)$ は光パルス内の時間依存ピークパワーである。周波数変調は位相変調の導関数で与えられ、すなわち、 $\omega = \gamma L [dP(t)/dt]$ 。放物線状パルスプロファイル $P(t) = P_0 [1 - (t/t_0)^2]$ 、ここで、 $(-t_0 < t < t_0)$ の場合、周波数

変調は線形である。それで、実際にパルスプロファイルも放物線状のままであり、線形周波数変調だけをもつ大きなピークパワーの発生と線形パルスチャープの発生とを可能にすることが、示されている。

【0058】Yb増幅器40で発生されたチャープパルスは、図4に示すような回折格子圧縮器を使って圧縮される。あるいは、チャープした回折格子にボール状の結晶42とレンズ41が、図9に示されるように、パルス圧縮のために使われる。図9に示すSM1fと関連して、約530nmのグリーンシフト領域でのフェムト秒パルスを出す非常にコンパクトな自立光源が得られる。

【0059】図9に示す受動モードロックYbファイバレーザ44のほかに、Yb増幅器にシード光源のために別の光源が使われる。これらの光源は、ランダムなEまたはE//Ybファイバレーザ、周波数シフトまたはHオフファイバレーザおよび、ダイオードレーザパルス光源を有する。これら別の光源は別々に示されない。

【0060】図10に示すファイバ供給モジュール(FDM)45が図1に示す基本システムに加えられる。この場合PSM2は除かれる；しかしながら、増幅モジュールのピークパワーを高めるためにPSM2は必要となさる。図10に示すYb増幅器7は非放物線状、放物線状の両方で動作できる。

【0061】最も簡単な構成では、FDM45が一本の光ファイバ46（供給ファイバ）からなる。放物線状増幅器の場合、供給ファイバ46はパルス品質での損失を招くことなくYb増幅器7に直接接続される。むしろ、放物線状パルスプロファイルにより、戻しの自己位相変調の場合でも、PCM4でのさらなるパルス圧縮を可能にするパルスに近似的に線形なチャープが追加される。PCM4は、図4に示す最小化パルス回折格子圧縮器14を使って供給ファイバと共にFDM45に集束化される。この場合、適当なコモードレンズと接続する供給ファイバは、図4に示す入力と置き換えられる。そのような実施の例々の図は示されていない。しかしながら、PCM4の使用は行動的で、たとえば、チャープ出力パルスがシステムから要求されるなら、省かれる。PCM4と共に、図10に記載されたシステムは、徹底的なチャープパルス増幅システムを構成し、ここで、パルスが時間に関して分散的に広げられる間、利得はもろもろ自己

23

位相変調も加えられる。通常のチャープパルス増幅システムに自己位相変調を付加することは、一般的にパルス圧縮後に大きなパルス変形をもたらす。放物線状パルスの使用はこの制約を回避する。

【0062】次世代ファイバ光通信システムは、チャープパルス増幅システムと解釈される（たとえば、D.J. Jones et al., J. Opt. Soc. Am. B, 8, 180 (1991)参照）。明らかに、放物線状パルスによるパルス変形の最小化は、光通信システムに等しく関連する。

【0063】50 f sより短いパルス幅を得るためには、FDMモジュールあるいは光PCM内の3次および高次の分散の制御が重要になる。PSMでの高次分散の制御は、図15に開示して既に議論された；FDMの高次分散の制御は、非常に類似しており、図11に示すFDM45 aの模倣的な実施例で議論される。図1に示すFDM45 aの模倣的な実施例で議論される。図1に示すように、大きな3次分散のW-ファイバはパルスPCM4の3次分散を補償するために使用される。図5に示すように、FDMの高次分散に対して異なる値をもつファイバ15、16、17を使うことで、パルス回折因子を有するPCMを含むシステムの高次分散が補償される。

【0064】PSMの別の実施例が図12及び図13に示されており、それらはPSMに市場で入手できる線形チャープファイバブラッグ回折因子を使用してできるようにするような実質的な同じ値をもつ。PCMもPSMも有する金チャープパルス増幅システムの高次分散を補償する。別の代替物として、非線形チャープファイバブラッグ回折因子もPCMの分散を補償するためにPSMで使用される。そのような変形は分離して示されていない。

【0065】W-ファイバの使用あるいはPSMでのL-モードを運搬するために、図12に示すようなPSMの別の実施例がPSM2bとして示されている。ここで良の線形チャープブラッグ回折因子47が、良の3次分散をもつ単一モード伝送ファイバ48とサーキュレータ49と接続して使用される。良の線形チャープブラッグ回折因子の導入は、PSM2bでの比（3次/2次）分散を増大させる。パルス回折因子補償器が使用されると、PCM4での3次分散の高い値の補償を可能にする。PSM2bは、PSMの複製をさらに改善するために線形チャープファイバブラッグ回折因子と接続したW-ファイバを含むことである。

【0066】高次分散補償用PSMの別の実施例として、図13に記述がPSM2cとして示されており、それは、正の線形チャープファイバブラッグ回折因子49、サーキュレータ50、および別のファイバ（逆変調回折因子51）を有する。ここで、PCMモジュール内の線形および高次分散を補償するために、正の線形チャープファイバブラッグ回折因子49は、正の2次分散を作り、他のファイバ逆変調回折因子51は、逆変調の付加的な2次、3次、4次分散を作る。一つ以上のファイ

(13)

特開2002-118315

24

バ逆変調回折因子あるいはファイバブラッグ回折因子が、3次、4次およびできればより高次の分散の逆変調値を得るために使用される。

【0067】Yb増幅器からの増幅されたパルスエネルギーをmJのオーダーおよびそれ以上で増大させるために、パルス線形変調とさらなる増幅段が図14に示すように実装される。この場合、パルス線形変調52は最初の増幅段AM13aと2番目の増幅段AM23bの間と、PSM2と最初の増幅段モジュールAM13aの間とに挿入される。任意の数の増幅器とパルス線形変調、最も高い可能な出力パワーを得るために使われ、ここで、最後の増幅器は好ましくは、多モードファイバからなる。回折因子出力を得るために、多モード増幅器の基本モードが選択的に励起され、よく知られた技術（M.E. Fermann et al., United States Patent, No. 5,818,690）に従ってガイドされる。パルス線形変調52は、一般的に音響-光変調器あるいは電気-光変調器のような光変調器からなるように選択される。パルス線形変調52は、SMから出てくるパルスの繰り返し遅延時間を考えられた値（たとえば、50 MHzから5 KHzへ）に下げ下げさせ、平均パワーは小さいままで非常に高いパルスエネルギーの発生を可能にする。あるいは、直接スイッチできる半導体レーザも、システムの繰り返し遅延時間を任意の値に固定するために使用される。さらに、後方の増幅器段に挿入されたパルス線形変調52も増幅器での増幅された自然放出の増幅を抑え、高エネルギーパルスに出力パワーを集中させることを可能にする。増幅段は、以前議論したようなPSMやPCMと整合しており、ここでは、金システムの分散がシステムの入出力で最も低い可能なパルスを得るために最小化される。

【0068】増幅器モジュールAM13aは、放物線状スペクトルをもつパルスを生じさせる放物線状増幅器のようにデザインされる。同様に、AM13aからの放物線状パルスは、図14にも示されるようなパルス線形変調あるいはパルス線形ファイバ53で放物線状パルススペクトルをもつパルスに変換される。ここで、自己位相変調と正分散の相互作用がこの変換をうまく行う。これは理解されるであろう、なぜなら、放物線状パルスプロファイルをもつチャープパルスが一部のファイバ中で放物線状スペクトルをもつ放物線状パルスに変化することができからである。放物線状パルス形状は、次の増幅段でかたより自己位相変調の量を最大化し、最後に、PSM2とPCM4で必要とされる分散パルス線形変調と逆変調の量を最小化する。同様に、放物線状パルス形状は、大きなパルス変形なしに、PSM2での十分な量の自己位相変調を誘起することを要する。

【0069】一度パルスが逆変調されると、次の増幅器での自己位相変調の有害な影響は、平らなパルス形状を使うことで最小化される。平らなパルス形状は、平らなパルススペクトルを生じさせるために、図14に示すような

(14)

特開 2002-118315

25

光強度フィルタ 5 4 を最後の増幅モジュールの前に挿入することによって生成される、平らなスペクトルは、十分なパルス強度の場合、本当に平らなパルスに変換される。なぜなら、十分なパルス強度の後のスペクトル含音量と時間遅れの間に直接の関連があるからである。自己位相変調の値が 10 ps と同じ大きさでも、大きなパルス変形を招くことなく平らなパルス形状に対して許容される。

[0070] 図 14 に示すような振幅フィルタも、増幅器でのパルススペクトルの再形成が簡便できるとき、すなわち、放物線状パルスが生成される体制の外側に、自己位相変調で強くチャープしたパルスに対する増幅器チェーンでの高次分散を制御するために使用される。この場合、自己位相変調は、かなりの量の次式で表される高次分散を生成する：

$$\phi_s^{(1)} = \pi P_s L_{eff} [d^2 S(\omega) / d\omega^2] \omega_s,$$

ここで、 P_s はパルスのピークパワーであり、 $S(\omega)$ は増幅化されたパルススペクトルである。 L_{eff} は有効非線形長さで、 $L_{eff} = [exp(gL) - 1] / g$ 、ここで、 L は増幅器長で、 g は単位長さ当たりの増幅器利得である。したがって、図 14 に示すような振幅フィルタで強くチャープしたパルスのスペクトルを正確に制御することで、任意の量の高次分散がチャープパルス増幅システムでの高次分散の値を確保するために導入される。それは、約 1 ns に拡張した 500 fs パルスに対して半高に示された、 ~ 10 ps の位相シフトは、 $1800 \text{ p} / \text{nm}$ の値をもつバルク格子からなるバルク圧縮器（図 4 に示すような）の 3 次分散を確保するために十分である。魅力的な制御性のよい振幅フィルタは、たとえば、ファイバ透過型回折格子であるが、任意の振幅フィルタが、パルススペクトルを制御するために、高次分散を引き起こす増幅器の前に使用される。

[0071] パルス探索器をもつ増幅器モジュールの組合せに対する別の実施例として、図 15 に示す構成が使用される。非常に高いエネルギーのパルスは、それらの増幅のために大きなコアの多モードファイバを必要とするので、シングルパルスの低損失保持ファイバ増幅器で基本モードを制御することは困難である。この場合モード結合を最小化するためと高品質の出力ビームを得るために、高度に中心対称の非線形保持ファイバ増幅器を使うことが好ましい。そのような増幅器から決定論的な確率に対して安定な偏光を得るために、図 15 に示すようなダブルパルス構成が要求される。ここで、単一モードファイバ 5 4 が増幅器 5 6 の最初のパスの後に空間モードフィルタとして使用される；あるいは、ここに開口が使用される。空間モードフィルタ 5 5 は、多モード増幅器 5 6 の最初のパスの後のモードを低減し、多モード増幅器の達成可能な利得を制限しながら高次モードの増幅された自然放出を抑える。レンズ 60 は、増幅器 5 6 の中と外に空間モードフィルタ 5 5、およびパルス探索器

26

5 2 a、5 2 b を結合するために使用される。ファイバ回折格子 5 7 は、後方伝播光が前方伝播光と直交するように偏光されることを確実にし、後方伝播光は、指示した偏光ビームスプリッタ 5 8 でシステムの外に出される。システムの高効率を最適化するために、システムの入力端で多モードファイバ 5 6 の基本モードに回折格子に近い光路が結合され、ここで、利得ガイドが多モードファイバで増幅されたビームの空間的品质をさらに改善するために使用される。SM から供給されるパルス列を返し周りを小さくするためと多モード増幅器での増幅された自然放出を抑えるために、第 1 光強度器 5 2 a が多モード増幅器の最初のパスの後に挿入される。選択的な場所では指示するように反射ミラー 5 9 の前である。結果として、80-70 dB の大きさのダブルパルス利得がそのような構成で得られ、pJ エネルギーをもつシングルパルスを mJ エネルギーレベルまで増幅することから要求される増幅段の数を最小化する。この種の増幅器は、以前議論したような SM_0 、 PSM_0 および PCM_0 と完全に合致し、mJ のエネルギーをもつフェムト秒パルスの発生を可能にする。高利得増幅器モジュール構築の別の代替物として、SM で供給されるパルス列の繰り返し周りを低下させることが、図 15 に示すような増幅器モジュールに導入する前に、付加的な第 2 変調器 5 2 b で行われる。第 1 変調器 5 2 a の透過窓の繰り返し周りと同じく、第 2 変調器 5 2 b の透過窓の繰り返し周りと同じくそれより低くなければならない。そのような構成は、別々に示されていない。図 15 は、ここに参考文献として添付された米国特許 4,400,350 の図 5 といくつかの類似性を共有する。

[0072] 本発明の別の実施例として、長い分布回折構造正分散増幅器 61 での放物線状パルスの形成を要求する光強度システムが図 16 に示されている。分散補償要素 63 が、ファイバ増幅器の後に挿入される。光ファイバ 62 が増幅器でのパルス形成プロセスを最適化するために、さらに調整される。光ファイバは、繰り返し透過スペクトル特性をもつように、規定された自由スペクトル範囲をもつ光電子デバイスに基づいており、波長分割多重で要求されるような多波長チャンネルの同時透過を可能にする。

[0073] キーとなる利得利便性は、ファイバ透過システムの光カー非線形性で導入されるチャープを低減するために、長い正分散ファイバの大きな利得を組合せることである。したがって、一般に、光強度システムの透過特性は、正分散（非リソトロン支持）増幅器を実装することで、改善される。そのような増幅器は、少なくとも 10 K の長さを持ち、10 dB/Km 以下の利得をもつ。光非線形性の有害な効果を最小化するための放物線状パルス形成の始まりを利用するために、増幅器当たりの結合利得は 10 dB を超えることができる。さらなる改善は、3 dB/Km 以下の利得をもち、総利得

(15)

特開2002-118315

27

28

が20dB以上であるように全長を長くした増幅器を使うことで増進される。ファイバ透過ラインの透過特性のさらなる改善は、ファイバ透過ラインの分散要素のカーブ形状の量を最小化することで得られる。これは分散要素のためにチャープファイバ回折格子を使用することで達成される。

【0074】透過ラインでの散乱増幅パルスの形成に加えて、外部光源で散乱増幅パルスを発生させること、そしてそれらを非リソニック増幅ファイバに注入することも有利である。そのようなシステムを有利に使用するために、ホリファイバで可能にされた低損失分散透過が有益である。ファイバ透過ラインに沿ってファイバ透過ライン端に分散増幅素子が実施される。そのようなシステムの実施は、図16に示すものに類似しており、別々には示されていない。上述のような類似のラインに沿ってデザインされた光温度システムは、ここに参考文献として添付された特許出願No. 00000に開示されている。

【0075】電気通信領域における本発明の8割の実施例として、波長可変ラマン増幅器がラマンシフトパルスを使って増進される。与えられたポンプ波長の高パワー光信号がラマン波長に準じたレッドシフトした信号波長のラマン増幅をするということは、前述の技術でよく知られている。事実、それは、ここで添付された波長可変パルス光源の構成に使用されるポンプパルス自体に作用する効果である。

【0076】波長可変ラマン増幅器の一般的なデザインが図17に示されている。ここで、短い光パルスはシード光源で作られる。シードパルスは図16で光学的に実施され、光増幅器68で増幅される。シードパルスは次に一本のラマンシフトファイバ67に注入される。ラマンシフトファイバは一本のホリファイバあるいはその他のデザインのファイバである。ラマンシフトパルス間の時間間隔は、図17に示すようなパルス分割手段（ポンプパルス分割器）68を使って減少される。このパルス分割手段は、たとえば、不均質なマッハウゼン干渉計のアレイであるが、単一パルスからパルス列を発生させる任意の手段が受け入れられる。適宜に波長シフトした増幅された減弱されたシードパルスは、ラマン増幅器69に注入されるポンプパルスを含み、信号入力70で動作し、信号出力71を作るために、図17に示すように、ラマン増幅器で信号波長の光増幅を発生する。

【0077】ラマン増幅器ファイバ内で、信号波長での光信号は、ラマン増幅器のポンプパルスと反対方向に伝播する。いくつかの信号波長も信号組合器を使ってラマン増幅器に注入され、そのような増幅器を光波長分割多重に合致するようになる。たとえば、波長1470nmのポンプパルスは、シリカファイバ中で1560nmの波長領域近辺でのラマン増幅を生成する。ラマン増幅器の利得を最適化するために、ホリファイバあるいは相

対的に小さいファイバコアをもつその他のファイバが使用される。

【0078】ラマン増幅が得られる波長の中心波長は、ポンプパルスの波長を同調することで同調される。ポンプパルスの波長同調は、ラマンシフトファイバ67に注入される前にシードパルスの幅とパワーとを最適化することで達成される。

【0079】さらに、ラマン増幅器の利得スペクトルはポンプパルスの波長を高速に同調することで調整され、信号パルスは、有効に変更されたラマン利得ベクトルに含み込まれる。有効なラマン利得が時間的に依存しないことを確かめるために、ポンプパルスを同調するスピード、すなわち、必要な波長範囲にわたってパルスを同調するのにかかる時間間隔は、信号パルスがラマン増幅器ファイバ69を移動するのに要する時間に対して小さくされなければならない。

【0080】このように、電気通信システムのラマン増幅器にとって、単一パルスからできる利得より広いスペクトル利得を得ることが有利である。異なる波長で伝送される変化するデータ量を確保するために、WDM電気通信システムの利得を動的に変えることができるとも有利である。スペクトル利得を広げる一つの方法は、通信ファイバを伝播する時間に比べてポンプ波長を早く同調することである。利得は、ポンプが異なる波長でとどまる時間を変えることで動的に調整される。利得スペクトルを調整する別の方法は、異なる波長ごとに大多數のポンプパルスをラマンシフトファイバに使用することである。各波長ごとに相対的な数のパルスを調整することには、相対的な利得プロファイルを変更することを可能にする。

【0081】より具体的に言うところ、図1に示されたフェムト秒パルス光源は、高パワーのためにY型増幅器で増幅される。これらのパルスは、フェムト秒パルス光源の動作より短い波長で分散散点をもつファイバで、1400-1500nm領域にラマン自己増幅散点される。このファイバはホリファイバでもよい。1400-1500nm領域にラマン自己増幅散点をもつフットレベルのパワーを達成するためには、光源の最適化してしる期間が1Gh以上の高周波数であるべきである。利得スペクトル拡張と自動利得調節は、異なる量のラマンシフトを得るために、大多數のポンプ波長を使用することで、ポンプ波長を同調することで、あるいは、パルス列の個々のパルスのパルス幅を調整することによって得られる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明に関する高ピーク、高平均パワー、超短レーザーパルス発生用のモジュール化したコンパクトな波長可変システムの概観である。

【図2】本発明に使用するためのシードモジュール（SM）の第一実施形態の概観である。

(16)

特開 2002-118315

29

30

【図3】本発明の第一実施例に関する与えられた入力パワーで出力される平均周波数送信パワーと波長の関係を示すグラフである。

【図4】本発明で使用するためのパルス圧縮器モジュール（PCM）の第一実施例の図である。

【図5】本発明で使用するためのパルス拡張器モジュール（PSM）の第一実施例の図である。

【図6】本発明で使用するためのシードモジュール（SM）の第二実施例の図である。

【図7】本発明で使用するためのシードモジュール（SM）の第三実施例の図である。

【図8】本発明で使用するためのシードモジュール（SM）の第四実施例の図である。

【図9】本発明で使用するためのシードモジュール（SM）の第五実施例の図である。

【図10】ファイバ分配モジュール（FDM）が、図1に示された本発明の実施例に付加された本発明の一実施

例の図である。

【図11】本発明で使用するためのファイバ分配モジュール（FDM）の第一実施例の図である。

【図12】本発明で使用するためのパルス拡張器モジュール（PSM）の第二実施例の図である。

【図13】本発明で使用するためのパルス拡張器の第三実施例の図である。

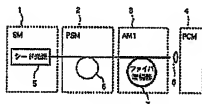
【図14】パルス係数素子と付加的増幅段が付加された本発明の一実施例の図である。

【図15】パルス係数素子と付加的増幅段と組み合わせるファイバ増幅器が少なくとも一つの前方パスと一つの後方パスで動作する本発明の別の実施例の図である。

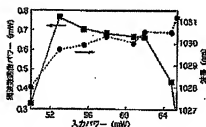
【図16】光通信の面における本発明の別の実施例の図である。

【図17】電気通信用波長可変ラマン増幅器の面における本システムの別の実施例の図である。

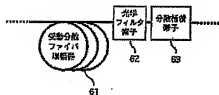
【図1】



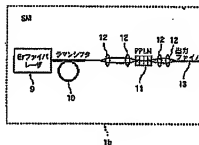
【図3】



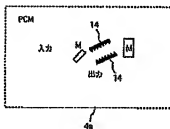
【図16】



【図2】



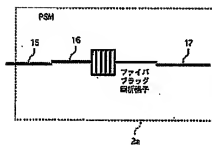
【図4】



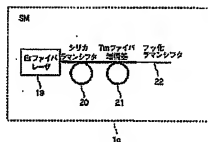
(17)

特開2002-118315

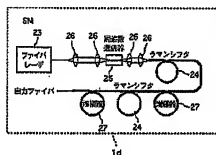
【図5】



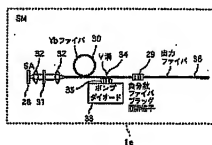
【図6】



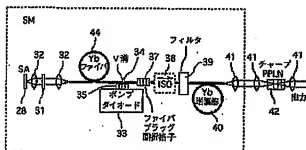
【図7】



【図8】



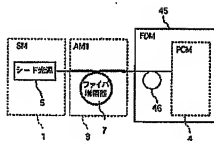
【図9】



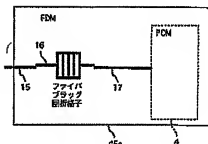
(18)

特開2002-118315

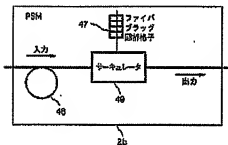
【図10】



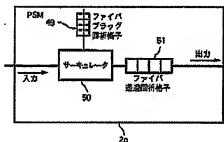
【図11】



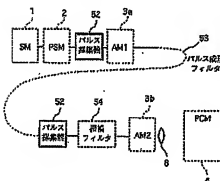
【図12】



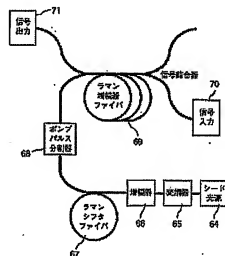
【図13】



【図14】



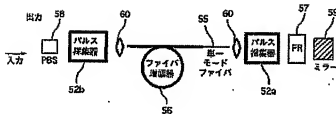
【図17】



(19)

特開 2002-118315

【図15】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.	識別記号	F I	ワード (参考)
H 01 S 3/109 3/30		H 01 S 3/109 3/30	Z
(72)発明者	ドナルド・ジェー・ハーター アメリカ合衆国 ミシガン州 アンアール ー サルグレイブ プレイス 3535番地	F ターム (参考)	2H050 AC81 AC83 AD00 2K002 AA02 AB12 AB30 AB31 BA03 CA02 CA03 CA15 DA10 EA07 EA30 HA20 HA24 5F072 AB07 AB08 AB09 AB13 AK06 JJ01 JJ07 KK07 KK12 KK30 QQ02 QQ07 RR01 SS08 YY15